

## 지열히트펌프시스템의 설치 및 운영이 토양·지하수에 미치는 영향에 대한 고찰

조윤주<sup>1</sup> · 이진용<sup>1\*</sup> · 임수영<sup>2</sup> · 홍경표<sup>2</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과, <sup>2</sup>환경부 토양지하수과

## A Review on Potential Effects of Installation and Operation of Ground Source Heat Pumps on Soil and Groundwater Environment

Yun-Ju Jo<sup>1</sup> · Jin-Yong Lee<sup>1\*</sup> · Soo-Young Lim<sup>2</sup> · Gyeong-Pyo Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Kangwon National University

<sup>2</sup>Soil & Ground Water Management Division, Ministry of Environment

### ABSTRACT

Recently use of renewable energies such as geothermal energy for space heating and cooling is increasing in Korea due to energy crisis and global warming. Ground source heat pump (GSHP) is known as one of the most environment-friendly HVAC (heating, ventilation and air-conditioning) systems in the world. However, some potential effects caused installation and operation of the GSHP systems on soil and groundwater environment are reported. The potential effects are closely related with inappropriate installation, operation and closure of the GSHP systems. In this paper, possible effects of the GSHPs on soil and groundwater environments are reviewed.

**Key words :** Ground source heat pump, Renewable energy, Geothermal energy, Soil, Groundwater

### 요 약 문

최근 에너지 위기와 지구 온난화의 영향으로 국내에서 건물의 냉난방에 지열에너지를 비롯한 재생에너지의 사용이 증가하고 있다. 지열히트펌프시스템은 지금까지 지구상에서 가장 환경친화적인 냉난방 공조설비의 하나로 알려져 있다. 그러나 지열히트펌프시스템의 설치 및 운영이 토양·지하수환경에 미칠 수 있는 몇 가지 영향들에 대한 보고가 있다. 이들 영향으로는 주로 지열히트펌프시스템의 부적절한 설치, 운영 및 폐쇄와 관련된다. 본 논문에서는 지열히트펌프시스템이 토양·지하수환경에 미칠 수 있는 영향에 관하여 고찰하였다.

**주제어 :** 지열히트펌프, 재생에너지, 지열에너지, 토양, 지하수

### 1. 서 론

전 세계적으로 유가의 급변과 수급의 불안정, 지구기후 온난화에 따른 화석연료 사용의 제한 등으로 인해 이를 대체하는 에너지 자원의 개발과 확보가 매우 시급한 국가적 현안문제로 대두되었다. 이에 기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물유기체 등을

포함하는 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 3개 신에너지(new energy) 분야(연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지)와 8개 재생에너지(renewable energy) 분야(태양열, 태양광, 바이오, 풍력, 수력, 지열, 해양, 폐기물)가 대안으로 부상하였다.

국내외적으로 과거에는 고엔탈피(high enthalpy) 지열의 직간접적 이용(지열발전 100~150°C, 난방: ~30°C)에 관심

\*Corresponding author : hydrolee@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2009. 3. 8 심사일 : 2009. 4. 23 게재승인일 : 2009. 5. 12

질의 및 토의 : 2009. 8. 31 까지

의 초점이 있었고 또 현재에도 심부지열원이 많은 북유럽의 경우 여전히 고엔탈피 위주로 이용이 이루어지고 있다(Dickson and Fanelli, 1994; 대한광업진흥공사, 2007). 그러나 1980년대 이후에 유비쿼터스 자원인 저엔탈피(low enthalpy: 10~20°C) 지중열원을 이용한 히트펌프에 관심이 모아지고 있으며 유럽의 다수 국가와 미국을 중심으로 빠르게 확산되고 있다(우정선, 2003; Yasukawa and Takasugi, 2003; 한국수자원공사, 2008). 우리나라는 일본, 이태리 등과 달리 화산대대가 거의 없어 심부지열의 직간접적 이용은 사실상 어렵다. 이에 따라 지하 100~150 m 깊이의 지열을 이용하여 건축물의 냉난방 및 온수공급에 이용하는 지열히트펌프의 지열에너지 보급이 활성화되는 추세이다(신·재생에너지센터, 2008).

특히 세계 각국은 지구온난화 가스 감축과 에너지 위기를 극복하기 위하여 신재생에너지 개발 및 이용을 촉진하는 각종 세제혜택과 지원책을 마련하였다. 우리나라도 2004년 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법”(2004년 12월 법령변경)을 통해 신·재생에너지 사업에 대한 투자권고 및 공공기관의 신·재생에너지 이용의 의무화(법 제12조)되면서 지열을 비롯한 재생에너지의 설치 및 이용이 확대되었다(이진용 외, 2008). 천부 지열의 경우 지리적 제약요건이 적다는 측면에서 다른 재생에너지(태양열, 태양광, 풍력, 해양에너지 등)에 비해 상대적으로 우리나라에서 적용성이 뛰어나다(최상규, 2003). 한편 미국환경청(USEPA)은 지열히트펌프시스템을 현존하는 냉난방시스템 중에서 가장 에너지 효율적이고 친환경적이며 비용효율적인 공조시스템이라 규정한 바 있다(USEPA, 1993).

본 논문에서는 상기와 같은 청정한 냉난방 공조시스템인 지열히트펌프시스템의 적용에 있어 혹여 발생 가능한 토양·지하수 환경영향을 국내외 사례를 통해 고찰하였다. 이를 통해 지열히트펌프시스템을 설치·운영함에 있어 지하수토양환경에 대한 영향을 최소화하는 방안을 모색하는데 목적이 있다.

## 2. 본 론

### 2.1. 지열히트펌프시스템과 환경영향

일반적으로 저엔탈피 지열을 이용하는 지열원 히트펌프(Ground Source Heat Pump, GSHP 혹은 Geothermal Heat Pump) 시스템은 열원의 종류에 따라 크게 4가지로 구분하며 이에 따라 지반 이용 히트펌프(Ground Coupled Heat Pump, GCHP), 지하수 이용 히트펌프(Ground Water

Heat Pump, GWHP), 지표수 이용 히트펌프(Surface Water Heat Pump, SWHP) 및 복합 지열원 히트펌프(Hybrid Ground Source Heat Pump, HGSHP) 시스템 등이 있다(신현준, 2004). 또한 열전달(교환)유체의 순환방식에 따라 밀폐형(closed loop type)과 개방형(open loop type)으로 구분한다.

지반이용 히트펌프(GCHP)는 지중에 설치된 루프를 통해 열교환 유체(물+부동액)를 순환시켜 열을 회수하거나 교환하는 방식의 시스템으로 밀폐형(혹은 폐쇄형)이라고 불린다. 이는 지중 열교환기의 설치방식에 따라 수직형과 수평형으로 구분하며 최근에 에너지파일형이 보급되고 있다(강신형, 2007). 지하수 이용 히트펌프(GWHP)는 지하수 자체가 열교환 유체의 역할을 하는 시스템으로 두개의 관정을 이용하는 복수관정형(개방형)과 단일관정을 이용하는 SCW(수주지열정) 방식으로 구분한다. 개방형의 경우 한 관정에서 지하수를 양수하고 다른 관정으로 이용한 지하수를 재주입하거나 인근 하천 등으로 방류하는 방식이며 SCW형은 단일관정에서 양수하고 동일관정에 지하수를 재주입하는 방식이다(Rafferty, 2001; 한정상 외, 2006; Lee et al., 2006). 우리나라에서는 지중열원으로 주로 지반과 지하수를 이용하며 순환방식으로는 밀폐형 지반이용 방식(수직형)과 밀폐형에 준하는 지하수이용 방식(SCW형)이 주로 적용되고 있다(Lee, 2009).

이러한 지열히트펌프 시스템의 설치 및 운영에 따라 발생 가능한 토양 및 지하수 환경영향은 지중열 교환기 설치를 위한 천공 시 부실관리에 따른 우수 및 지표오염물질의 유입, 히트펌프 내부 냉매의 누출, 지중열 교환루프에서의 열교환 유체의 누출, 그라우팅 물질에 의한 토양·지하수 영향, 지하수온 변화에 따른 지하수화학 및 미생물 변화, 재주입 지하수에 의한 수질변화, 지하수 사용에 따른 지반침하, 수량변화 가능성 및 지열시스템 폐쇄 시 열교환 유체의 부적절한 방치 등으로 구분할 수 있다.

### 2.2. 천공과정에서 관리부실

2000~2008년 8월까지 국내에 설치된 지열히트펌프시스템을 살펴보면 지역, 기후조건에 따라 상이하기는 하지만 일반적으로 밀폐형은 3 RT당 한 천공(borehole)을 150~200 m(평균 158 m)로 설치하며 SCW형은 30 RT당 한 관정(well)을 500 m로 설치하고 있다(Fig. 1).

또 국내에 설치된 지열시스템은 한 지열시스템 당 수직 밀폐형에 평균 32개의 보어홀을 설치하고 SCW형에 평균 7개의 관정을 설치하였다(Lee, 2009). 특히 수직밀폐형에서 많은 수의 천공을 할 경우 천공기간이 길어지며 실내

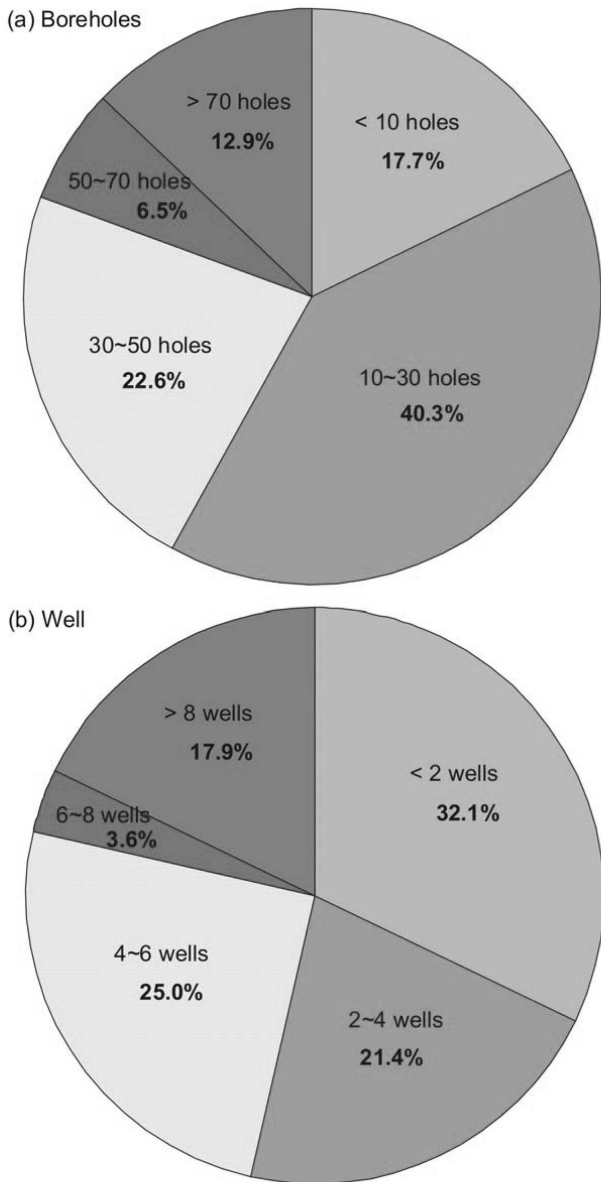


Fig. 1. Number of boreholes and wells installed for (a) closed and (b) SCW heat pump systems in Korea (Lee, 2009).

기(히트펌프 및 실내 덕트 등)와 연결하여 시스템을 완성하기까지 상당 기간이 소요된다. 이는 일반적인 지하수 이용·개발시설을 설치할 때보다 상대적으로 더 오랜 시간이 소요되지만 적절한 관리가 없어 강우 시 빗물의 유입 및 지표 오염물질의 지하 침투 등으로 인한 토양 및 지하수 오염이 우려되기도 한다(PADEP, 1996; USEPA, 1997, 1999). SCW형 관정의 지하수에서 수질검사를 한 결과 천공기간 동안 지표오염물질 유입을 의심케 하는 일반세균 및 질산성질소가 비교적 높게 나타나 적절한 관리가 필요한 것으로 사료된다(이진용 외, 2008).

2.3. 히트펌프 냉매의 영향

히트펌프는 일반적으로 냉매(refrigerant)를 사용하며 전 세계에서 가장 많이 사용되어온 냉매는 HCFC-22(R-22)이며(NRCan, 2002b), 국내에 2008년까지 설치된 지열히트펌프에도 R-22가 대부분(~96%)을 차지한다(한국건설기술연구원, 2005a). R-22는 염소를 포함하고 있으며 오존고갈지수(Ozone Depletion Potential)가 CFC 보다 낮지만 전 세계적으로 이들의 생산과 사용을 금지하고 있다. 캐나다는 2020년까지 사용을 완전히 금지시킬 계획이며 기존의 냉방기 및 에어컨 시설(0.5%)의 사용만 2030년까지 유예시켰다(NRCan, 2002b).

현재 세계적으로 R-22를 대체하는 냉매가 연구개발 중이며 R-410A(HFC-32와 HFC-125의 혼합물)와 R407C(HFC-134a와 HFC-125의 혼합물)가 상용화 중이다. 스웨덴에서도 히트펌프의 냉매로 기존에 사용하던 CFC(1998년)와 HCFC(2002년)를 금지하고 2003년부터 주로 R407C와 R404A, R290(프로판)을 사용하며 공기 대 공기 히트펌프는 R410A를 주로 사용한다(Karlsson et al., 2003). 최근에는 국내에서도 R410A를 이용하는 사례가 증가하고 있다(이진용 외, 2008). 이러한 냉매는 오존고갈 가능성과 독성 및 가연성이 있지만(EST, 2007a), 히트펌프 내부에서 누출되어 토양·지하수오염을 유발할 가능성은 낮은 것으로 사료된다(이진용 외, 2008).

2.4. 열교환 유체(부동액)의 누출영향

히트펌프의 열교환 유체(heat exchange fluid)는 일반적으로 물과 동결방지제(antifreeze fluid: ~20%)로 구성되며 때에 따라 부식방지제(anti-corrosive)가 첨가된다(Mehnert, 2004; Klotzbucher et al., 2007). 이러한 열교환 유체는 냉방모드(응축기)의 경우 실내의 열을 지중으로 방출하고 난방모드(증발기)의 경우 지중에서 흡수한 열을 실내로 전달하는 역할을 한다. 이때 사용되는 동결방지제는 동절기 동파방지를 위해 일정조건을 구비한 부동액을 사용해야 한다.

일반적으로 국내외에서 사용하고 있는 부동액은 메탄올, 에탄올, 프로펠렌글리콜, 아세트산칼륨 등이 있으며(NRCan, 2002b; Mehnert, 2004; 한국건설기술연구원, 2005a; 신현준, 2007; CDPH, 2007; EBA, 2007), 이는 90% 이상의 생분해성, 저부식성, 고발화점(>90°C), 저독성, 저장 안정성 등의 조건을 만족하여야 한다(DenBraven, 1998; MDNR, 2004; IGSHPA, 2007; USACE, 2008). 이에 따라 대부분의 국가는 열교환 유체로 물만 사용하는 것을 전면적으로 허용하고 있으나(DenBraven, 1998), 우

리나라에서 물만 사용하는 경우는 매우 드물다(McCray, 1998). 많은 경우 공업용 메탄올(10~20%)을 사용하는데 (이진용 외, 2008) 이는 부식성이 크며 생분해성이 낮고 사람이 장기간 고농도에 노출되면 두통, 멀미 등이 발생하며 독성 및 인화성이 있는 것으로 알려져 있다 (Heinonen et al., 1998). 그 결과 미국은 최근에 지열히트펌프에 사용하는 것을 금지하였으며 캐나다도 온타리오를 비롯한 다수 주에서 금지하고 있다(EBA, 2007).

밀폐형 지중열교환 루프내의 열교환 유체는 장기간 운영 중에 지중루프의 부식이나 자연적 혹은 인위적 사고로 인하여 누출될 수 있으므로 지하수오염의 가능성이 있다 (Rutherford, 2004; Klotzbucher et al., 2007). 또한 밀폐형 지열히트펌프의 수명이 다하여 폐쇄할 때 대부분 지중열교환기(BHE)의 연결배관만 잘라내고 지중부분은 방치하여 지중루프 내에 남아있는 부동액이 점차 누출되어 장기간 지하수오염을 유발할 수 있는 것으로 알려지고 있다. 예를 들어 염화칼슘이나 염화마그네슘, 에탄올 등을 지중루프 내 부동액으로 사용했을 경우 이들이 누출되면 주변 그라우트(grout)의 투수계수(coefficient of permeability)를 증가시키기 때문에 지표오염물질 등의 유입을 초래하여 지하수를 오염시킬 수 있다는 보고도 있다(Jo et al., 2001; Mehnert, 2004). 그러므로 폐쇄시 지중루프 속에 남아있는 부동액 회수(recovery) 및 세척(flushing)을 철저히 할 필요가 있다.

### 2.5. 그라우트(GROUT)의 영향

그라우트는 BHE(Borehole Heat Exchangers)와 주변 지중과의 열 교환을 원활하게 할 뿐만 아니라 지상 오염물질이 공내로 유입되거나 보어홀 주변 지하수가 지표로 유출되는 것을 막고 또 다른 대수층을 관통한 보어홀로 인해 상호 물질교환이 발생하는 것을 방지하는 역할을 한다(Allan and Philippacopoulos, 1999; 정하익, 2006; 조정식, 2006; 최항석 외, 2008). 밀폐형 지열히트펌프를 설치할 때 150~200 m 깊이의 보어홀(직경 약 150 mm)에 U 루프를 설치한 후 루프와 보어홀의 빈 공간에는 투수성이 낮고 열전도성이 좋은 그라우트로 뒤채움을 한다(최항석 외, 2008; Fig. 2).

그라우트가 상기한 역할을 하기 위해서 적절한 특성을 갖추어야 하는데 일반적으로 투수계수가 충분히 낮고( $10^{-7}$ ~ $10^{-9}$  cm/sec), 열전도 계수가 크며 화학적으로 안정하여 수축에 저항하며 혼합이 용이해야 한다(Allan and Philippacopoulos, 1999; 한국건설기술연구원, 2005a; 최항석 외, 2008). 이에 따라 대부분의 국가에서 사용하는 그

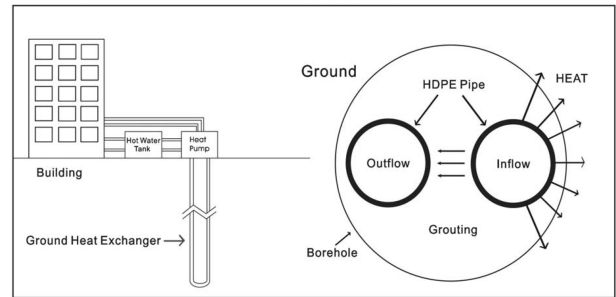


Fig. 2. Installation of BHE and schematic diagram of borehole (modified from Choi et al., 2008).

Table 1. General grout used for BHE (KICT, 2005a)

Grout	Explanation
Bentonite only	• Na bentonite+H <sub>2</sub> O
Bentonite/Additive mixing	• Na bentonite+Silica (or fine sand)
Cement only	• Hydration cement+H <sub>2</sub> O
Cement/Additive mixing	• Cement+Bentonite (or sand)+H <sub>2</sub> O

라우트는 순수 벤토나이트, 벤토나이트/첨가제 혼합, 순수 시멘트, 시멘트/첨가제 혼합 등으로 구분할 수 있다(Table 1; MDNR, 2004; 한국건설기술연구원, 2005a).

그런데 투수계수가 충분히 낮아 상부로부터 지표오염물질을 막는 역할을 해야 하는 그라우트가 지열원 시스템의 장기간 운영에 따라 수축이 발생하여 그라우트 구간에 틈(crack)이 발생하면 지표 오염물질이 유입되어 지하수 오염을 유발할 수 있다. 시멘트계 그라우트의 사용 또는 지중열교환에 따른 보어홀 주변의 온도 상승으로 그라우트의 수밀성이 감소하여 지하수 오염이 발생할 가능성도 배제할 수 없다(Johnson et al., 2006). 특히 시멘트계의 그라우트를 사용할 경우 pH의 상승으로 인한 지하수 이용성 감소 등 장기간의 수질교란이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Kim, 2003). 또한 그라우트(대부분 Na 벤토나이트+규사)의 용탈(leaching)이 Na와 Si의 부화(enrichment)로 나타날 수 있어 수화학 조성 변화도 발생할 가능성이 있다.

### 2.6. 온도변화 및 재주입지하수에 의한 영향

지하수히트펌프시스템(GWHP)은 양수한 지하수를 열교환 후 방류하거나 대수층으로 재주입(SCW형+개방형(two well))한다(Rafferty, 2001; Lee et al., 2006; Fig. 3). 우리나라는 전체 지열원히트펌프의 약 30%가 SCW형이며 완전한 개방형(two well)은 드물다(Lee, 2009). SCW형의 경우 양수한 지하수는 일정시간 후에 원래 대수층에 재주입하거나 드문 경우 상부 토양층에 주입할 수도 있다.

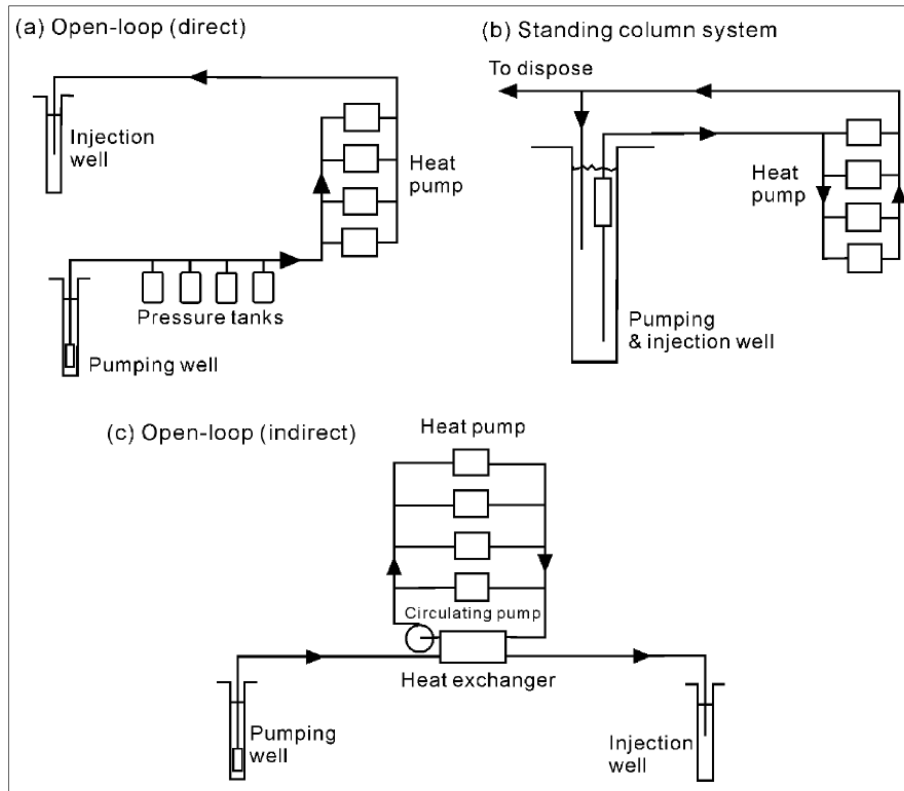


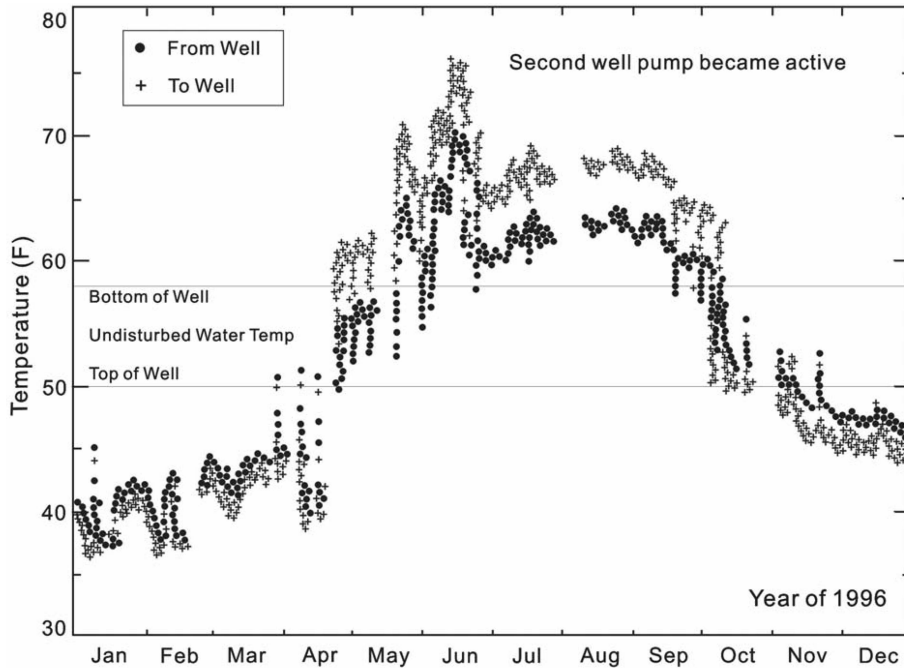
Fig. 3. General schematic diagram of groundwater heat pumps (Rafferty, 2001; Lee et al., 2006).

일반적으로 지하수(혹은 지중)의 온도변화는 대수층 지하수의 화학적 균형을 교란시켜 미생물 군집 및 용존 이온의 용해도(이온평형)에 영향을 미치고 수질 변화를 유발할 수 있으며(USEPA, 1997; EST, 2007b), 대수층의 지하수 유동 능력을 변화시킬 수 있다(Knape, 1984). 지하수의 온도만 이용하는 지하수히트펌프시스템은 이용모드에 따라 4~10°C 정도 상승하거나 하강한 지하수를 재주입 한다(Fig. 4). 이로 인한 대수층의 수온 변화는 연간 10°C 이내이며 물리적 변화는 발생하지만 재주입 지하수와 원대수층 지하수의 수질에는 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있으며(Armitage et al., 1980; Knape, 1984; USEPA, 1997; NRCan, 2002b) 냉방모드와 난방모드의 주기적 전환으로 인하여 연중 온도변화의 영향은 상쇄되는 것으로 기대한다(USEPA, 1997). 그러나 지열히트펌프 시스템은 오랜 기간 동안 운영된 후에 온도로 인한 문제를 파악할 수 있는 측면이 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하다(Andrews, 1978; Williams and Sveter, 1987; USEPA, 1999).

한편 지하수 재주입은 온도차 외에 대수층의 수압과 용존산소 농도를 변화시켜 금속의 침전과 3가철의 산화를 유발할 수 있다(USEPA, 1997). 대부분 산소가 많은 지하

수(USEPA, 1999; Table 2)가 혐기성 상태의 대수층에 주입되면 철수화물이 형성되며 용존산소가 증가하면서 호기성 박테리아의 증가를 가져와 다시 2가철의 3가 철수산화물 침전을 배가시킨다. 또한 히트펌프내부를 순환하는 지하수는 장기간의 운영에 따라 배관과 펌프로부터 금속(주로 Cu, Pb)이 용출(leaching)되어 원 대수층을 오염시키거나 살균제 및 방식제 첨가에 의해 염소 및 용존고형물질(TDS) 등이 이차적인 수질기준(Secondary MCLs)을 초과하기도 한다(USEPA, 1999). 캘리포니아에서는 재주입 지하수정에서 가장 문제가 되고 있는 것이 칼슘과 철의 침전이라고 보고하였다(Williams and Sveter, 1987).

국내에도 혐기성 상태의 지하수에서 양수에 의한 철과 망간의 침전이 흔한 것으로 알려졌으나(김형수 외, 2002; 이진용 외, 2006) 우리나라는 현재 지하수형의 경우 생활용수기준을 적용하고 있으므로 문제가 될 소지는 적다. 그러나 상대적으로 난방부하가 큰 경우 재주입 지하수의 온도가 원 지하수보다 낮아지거나 용존산소의 용해도가 증가하여 대수층 수질조성에 변화를 유발할 수 있다. 또 원 대수층이 오염되었을 경우 이를 다른 대수층에 주입한다면 또 다른 지하수 오염을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다(USEPA, 1999). 그러나 지열시스템을 국내에 설



**Fig. 4.** Water temperatures of standing column well in Haverhill public library in USA (Conversion of heating and cooling mode; modified from Deng, 2004).

**Table 2.** Groundwater quality measured at an entrance (IN) and an exit (OUT) of domestic Jinju SCW heat pump system (by courtesy of Dr. Hyoung Soo Kim at K-Water)

Parameter	2005. 03. 08		2005. 05. 31		2005. 08. 31		2005. 10. 27		2005. 12. 09	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
Temperature (°C)	20.95	15.44	21.75	20.80	20.15	33.60	20.23	20.31	17.98	17.35
EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	259	241	273	268	214	284	247	247	239	234
DO (mg/L)	0.88	2.27	1.13	4.94	9.23	2.03	1.92	2.85	2.07	1.70
pH	8.63	8.96	8.52	8.34	7.95	7.52	8.14	8.09	7.83	8.01
ORP (mV)	81.2	70.6	108.4	140.4	137.4	120.2	131	118	170.1	144
Alkalinity (mg/L)	152.0	160.1	25.5	22.5	22.5	22.5	23.5	23.0	23.0	23.5

치·운영한지 얼마 되지 않아 지하수 영향에 대해 선부른 판단을 하기 어려우며 장기적인 모니터링이 필요하다 (Rybach, 2003).

### 2.7. 지하수 사용에 따른 지반침하 및 지하수량 변화

일반적으로 지하수히트펌프는 지하수를 양수하여 전량 인근 하천 등으로 방류하거나, 인근의 다른 관정으로 재주입(two well system) 혹은 동일 관정에 재주입(SCW)한다. 첫 번째 경우는 일반적인 지하수·개발이용시설의 경우와 마찬가지로 지하수 사용량에 따라 지하수위 하강과 지반침하의 우려가 있다. 특히 도심지에 완전 개방형 지하수히트펌프를 다수 설치한다면 수리지질학적 안정성을 해쳐 일반적인 도심의 지하수 과다사용에 따른 지하수위 하강 및 지반침하 영향과 동일한 현상을 유발할 수

있다(이진용·구민호, 2007; 헤럴드경제, 2008). 반면에 다른 관정이나 동일 관정에 주입하는 경우에는 상대적으로 이러한 영향이 적은 것으로 나타난다(USEPA, 1999). 국내에서 완전 개방형은 거의 없으며 대부분 SCW형으로 양수한 지하수는 전량 재주입하는 것으로 파악된다. 결국 SCW형으로 시공하는 경우 기존의 지하수개발·이용시설과 달리 단기적으로 영향권역에 지하수위 하강을 유발하겠지만 장기적으로 물수지 균형을 이룰 것으로 기대된다 (Kavanaugh and Rafferty, 1997).

### 2.8. 심부천공으로 인한 대수층 연결 및 수리적 간섭

우리나라는 미국과 캐나다처럼 토양층(천부 충적대수층)이 두껍게(~수 백미터) 발달되어 있는 것이 아니라 대부분 수 미터의 토양층(혹은 충적대수층 2~30 m) 밑에 바로 암

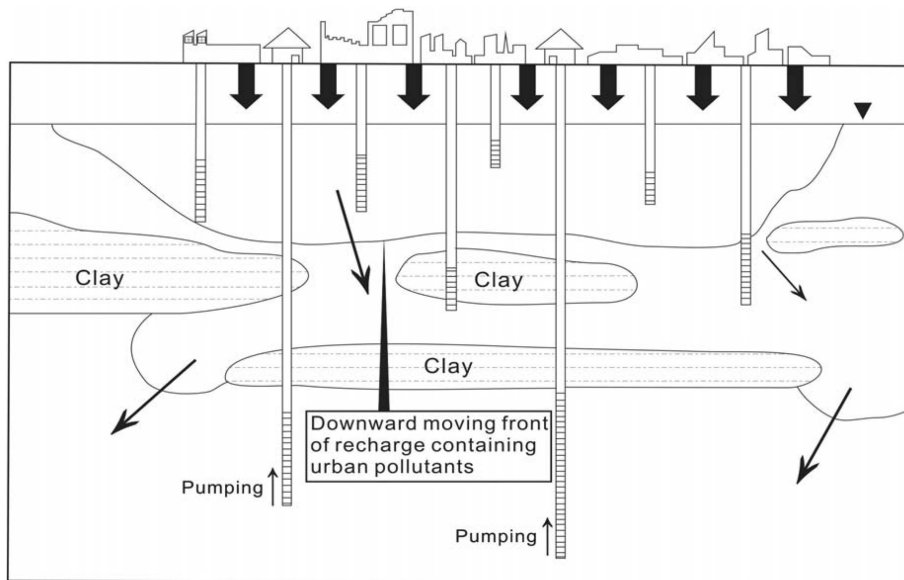
반대수층이 발달해 있다(Lee and Hahn, 2006). 이러한 수리지질학적 특징은 밀폐형과 SCW형의 지중열교환기(BHE 혹은 관정)를 설치할 때 미국, 캐나다 및 유럽 등(밀폐형은 30~60 m 이내, 수주지열정은 ~150 m)과 달리 심부암반까지 굴착하게 되는 요인이 된다(밀폐형은 150~200 m, 수주지열정은 ~500 m). 지중열교환기 설치를 위한 심부 천공은 상부 충적대수층과 하부 암반대수층을 연결하는 통로가 될 수 있다(EST, 2007b). 이로 인해 시공 중에 지표 오염물질이 유입되거나 시공상 결함(혹은 자연적 변형)으로 그라우트에 손상이 가해지면 이를 통해 암반지하수까지 오염시킬 수 있다(Fig. 5).

또한 상부 충적대수층과 하부 암반대수층을 분리하는 불투수층이 충분히 발달되어 있지 않을 경우 하부 암반대수층에서 양수를 하게 되면 인근의 지하수 흐름이 상부 충적대수층에서 하부 암반대수층으로 향하게 되어 천부대수층의 오염이 하부로 확산될 수 있다. 지하수를 이용하는 히트펌프시스템의 경우에는 일정구역 내에 다수의

시스템을 설치하였을 때 일반 지하수개발·이용시설과 마찬가지로 수리적 간섭현상이 예상되며 지하수오염이 가능한 것으로 나타났다.

**2.9. 생물학적 환경영향**

지하수(지중)의 온도 및 수질 변화는 자생하는 미생물의 변화를 유발할 수 있지만(Snyder and Lee, 1980; Hicks and Stewart, 1988) 실제로 이에 대해 보고한 연구사례는 많지 않다(NRCan, 2002b). Kai et al. (2005)은 지하수 히트펌프시스템의 경우 열에 의한 미생물환경의 변화는 찬물과 따뜻한 물이 만나는 경계부를 제외하고는 크게 발생하지 않는다고 보고하였다. York et al. (1998)은 뉴저지주 리차드 스톡톤(Richard Stockton) 대학에 3개의 대수층을 통과하는 130 m 지중열교환기를 설치하여 대규모 밀폐형 지열히트펌프시스템에서 열적 변화가 미생물환경에 미치는 영향을 연구하였다(본 시스템은 1993년에 설치; Table 3).



**Fig. 5.** Downward movement of upper part pollutant by depth groundwater development in Bolivia Santa Cruz city (modified from Lawrence et al., 1998).

**Table 3.** Summary of a large scale ground source heat pump system in New Jersey (York et al., 1998)

Types	Explanation
Location and year	New Jersey Stockton University, Establishment in 1993
Geothermal system	Vertical closed loop
Heat exchanger	130 m (tree aquifer perforation), 400 borehole (U bend HDPE) 400 borehole×10 line (university parking place)
BHE area	14,164 m <sup>2</sup> (3.5 acres)
Ground temperature change	Seasonal ground temperature range: 12~28°C
Aquifer feature	15 m (Upper Cohansay), 45 m (Lower Cohansay), 100 m (Rio Grande)

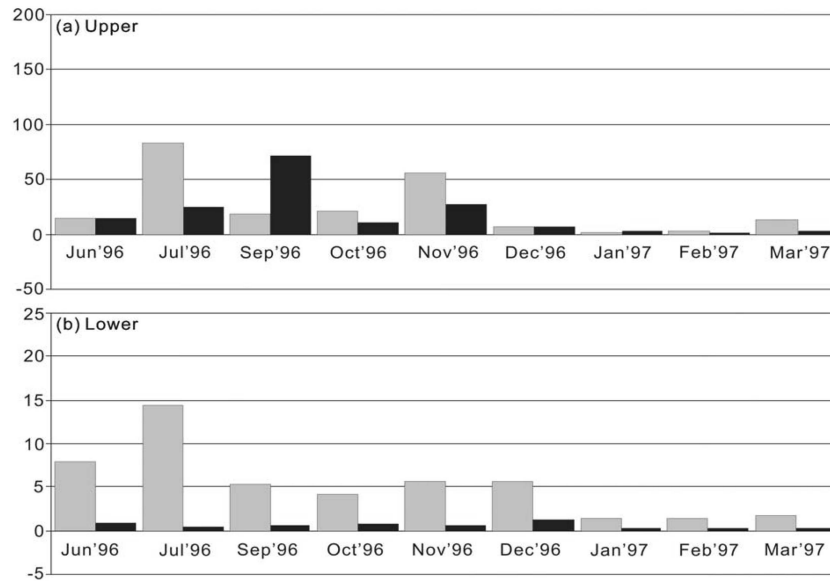


Fig. 6. Total bacterial numbers at upper and lower parts of Cohansey aquifer (gray: affected, black: control; modified from York et al., 1998).

본 연구에서 영향을 받는 지역(회색)과 영향을 받지 않는 지역(흑색)으로 나누어 총 박테리아의 수를 시험한 결과 상부대수층에서는 영향지역과 비교지역 박테리아 수의 차이가 없거나 오히려 영향지역이 적는데 반하여, 하부 대수층에서는 확연히 구분될 정도로 조사기간에 걸쳐 모두 영향지역에서 박테리아가 증식된 것을 확인하였다. 이러한 박테리아 증식의 결과는 스톡톤 지열히트펌프의 장기간 운영으로 전체적인 지온이 상승하여 나타난 것으로 해석할 수 있다(York et al., 1998; Fig. 6). 그러나 이러한 영향은 온도영향 권역내로 한정되며 그 외부는 정상적인 상태라고 보고하였다(Sowers et al., 1997). 즉 적절한 수리지질조사에 기반한 설계만 있다면 본 시스템에 의한 미생물학적 영향은 적은 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

위에서 우리는 친환경적 냉난방 공조설비로 알려진 지열히트펌프시스템의 설치 및 운영이 토양·지하수에 줄 수 있는 환경적 영향에 대하여 살펴보았다. 흔히 지열시스템의 토양지하수 영향에 관하여 상반된 의견 혹은 다른 연구결과가 있음을 알 수 있다. 그런데 국내의 지열시스템은 외국에 비해 상업적으로 적용된 시기가 짧기 때문에 영향에 관련된 보고 혹은 연구사례가 많지 않다. 그러나 이러한 청정시스템을 올바로 설치하지 않거나 사후관리를 제대로 하지 않으면 토양·지하수의 영향 가능성을 배제할 수 없다. 시스템 설치를 위한 천공 혹은 관정의 수는 설

치지역의 지질 및 지하수량을 충분히 고려하여 결정해야 하며 천공 기간 및 천공 후에 적절한 관리가 필요하다. 히트펌프에 사용되는 냉매, 부동액 및 그라우트는 각국의 정부 및 지방정부가 제정한 법령조건을 만족해야 한다. 지하수를 이용한 히트펌프 시스템은 사용한 지하수를 재주입할 경우 온도차이로 인한 미생물의 종변화 및 개체수의 변화를 장기적인 모니터링을 통해 관찰해야 하며 온도차이 외에 나타날 수 있는 금속류의 침전 등도 추가적인 모니터링이 필요하다. 즉 지열히트펌프시스템의 사용으로 인한 토양·지하수의 영향을 최소화하기 위해서는 시공업체의 전문적인 지식 및 기술이 요구되며 설치 후 적절한 관리가 필요하다. 또 장기간 운영된 시스템의 사후관리도 적절히 행해져야 한다.

### 사 사

본 총설은 환경부(토양지하수과)가 의뢰하고 한국지하수토양환경학회가 수행한 “지열시스템이 토양·지하수에 미치는 영향에 관한 연구”의 일부이며 이에 감사드립니다. 본 논문은 저자 개인의 의견으로 환경부의 공식적 의견과 다를 수 있습니다. 건설적인 지적사항을 주신 심사위원님들께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참 고 문 헌

강신형, 2007, 건축설계시 지열설비 적용 방안: 우리의 지구, 땅



의 열을 에너지원으로. 신재생에너지 설치의무화 기술세미나, aT 센터.

김형수, 김충환, 김병균, 백건하, 최현숙, 2002, 충적층 지하수의 철, 망간 가장 및 효율적 처리 방안 연구-강변여과수 개발 현장을 중심으로. 한국지하수토양환경학회 추계학술대회, 부산대학교, p. 125-128.

대한광업진흥공사, 2007, 지열에너지의 이용 현황 및 향후 전망. 대한광업진흥공사, p. 19.

신.재생에너지센터, 2008, 지열. 에너지관리공단 신.재생에너지센터 홈페이지, www.knrec.or.kr, Access at August 6, 2008.

신현준, 2004, 지열원 열펌프 시스템 관련 기술 및 적용 사례. 공공기관 대체에너지 이용의무화 제도 및 적용모듈 설명회, p. 1-65.

신현준, 2007, 지열원 열펌프 냉난방 시스템의 기술 및 시장 현황. 2007 Geothermal Energy Symposium, IGSHPA-Korea 지열에너지 기술현황과 전망, 한국지열에너지기술지원센터, 강원대학교, p. 62-85.

우정선, 2003, 지열, 지열원 열펌프. ETIS 분석지, 23, 129-142.

이진용, 구민호, 2007, 도시화가 지하수에 미치는 영향 및 도시지역 지하수 문제 고찰. 지질학회지, 43(4), 517-528.

이진용, 천정용, 이명재, 최미정, 김현중, 전선금, 문형준, 전성천, 2006, 인천기지 Pump 고장원인 조사를 위한 이물질 생성원인 분석. 초안보고서, E1, p. 104.

이진용, 이종규, 김정우, 김창균, 2008, 지열시스템이 토양-지하수에 미치는 영향에 관한 연구. 최종보고서, 환경부, p. 240.

정하익, 2006, 지열에너지 개발과 토양 및 지하수 오염. 한국지열에너지학회지, 2(1), 31-43.

조정식, 2006, 지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구. 산업자원부, 최종보고서 2004-N-GE08-P-01.

최상규, 2003, 지열히트펌프는 국내 여건에 최적인 대체에너지. 에너지경제신문 2003년 2월 15일자, 한국기계연구원.

최항석, 이철호, 최효범, 우상백, 2008, 지중 열교환기용 뒤채움재의 물리적 특성 연구. 한국지반공학학회논문집, 24(1), 37-49.

한국건설기술연구원, 2005a, 지열원 열펌프 설비 공사 시방서. 한국건설기술연구원, 일산, p. 177.

한국수자원공사, 2008, 지하 열 자원 부존 · 활용 정보시스템 구축: 강변여과수(충적층 및 하상) 열자원 활용 기술. 에너지 · 자원기술개발 최종보고서, 한국수자원공사, 한국지질자원연구원, p. 178.

한정상, 한희상, 한찬, 김형수, 전재수, 2006, 수주지열정(SCW)을 이용한 천부지열 냉난방시스템 설계지침. 자원환경지질, 39(5), 607-613.

헤럴드경제, 2008, 상하이 등 무분별 지하수 개발 고강 도로포장 영향 빗물 스며들지 않아. 2008년 8월 7일자.

Allan, M.L., Philippacopoulos, A.J., 1999, Ground water protection issues with geothermal heat pumps. Geothermal Resources Council Meeting, Reno, NV, p. 9.

Andrews, C.B., 1978, Impact of the use of heat pumps on ground-water temperatures. *Ground Water*, 16(6), 437-443.

Armitage, D.M., Bacon, D.J., Massey-Norton, J.T., Miller, J.D., 1980, Ground-Water Heat Pumps: an Examination of Hydrogeologic, Environmental, Legal, and Economic Factors Affecting Their Use. U.S. Department of Energy, Washington, D.C., DOE/CS/20060-5120 (V.1), p. 246.

CDPH (Connecticut Department of Public Health), 2007, Recommendation for Regulation of Geothermal Wells. Report to the General Assembly, State of Connecticut, p. 17.

DenBraven, K., 1998, Survey of geothermal heat pump regulations in the United States. *Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference*, The Richard Stockton College of New Jersey, p. 1-9.

Deng, Z., 2004, Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems. ph.D thesis, Oklahoma State University, p. 303.

Dickson, M.H., Fanelli, M., 1994, Small geothermal resources: A review. *Energy Sources*, 16(3), 349-376.

EBA, 2007, Professional Guidelines for Geoexchange Systems in British Columbia. Part 2-Design. British Columbia, p. 47.

EST (Energy Saving Trust), 2007a, Discover Renewable Energy: Using Warmth from the Ground to Heat Your Home. EST, London, p. 4.

EST (Energy Saving Trust), 2007b, Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and Installation of Closed-Loop Systems-A Guide for Specifiers, Their Advisors and Potential Users. EST, London, p. 24.

Heinonen, E.W., Wildin, M.W., Beall, A.N., Tapscott, R.E., 1998, Anti-freeze fluid environmental and health evaluation-an update. *Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference*, p. 1-11.

Hicks, R.J., Stewart, D.L., 1988, Environmental assessment of the potential effects of aquifer thermal energy storage on micro-organism in groundwater. PNL-6492, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.

IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association), 2007, Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems: Design and Installation Standards. IGSHPA, OSU, OK, p. 24.

Jo, H.Y., Katsumi, T., Benson, C.H., Edil, T.B., 2001, Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(7), 557-567.

Johnson, Jr., R.C., Kurt, C.E., Dunham, Jr., G.F., 2006, Well grouting and casing temperature increases. *Ground Water*, 18(1), 7-13.

Kai, Z., Hongwei, F., Lixu, W., 2005, Bacterial growth in a

- groundwater source heat pump system. *J. Tsinghua University (China)*, **45**(12), 1608-1612.
- Karlsson, F., Axell, M., Fahlén, P., 2003, Heat Pump Systems in Sweden. Country Report for IEA HPP Annex 28, p. 29.
- Kavanaugh, S.P., Rafferty, K., 1997, Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. ASHRAE, Atlanta, p. 167.
- Kim, K., 2003, Long-term disturbance of groundwater chemistry following well installation. *Ground Water*, **41**, 780-789.
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K.L., Haderlein, S.B., 2007, Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics*, **36**, 348-361.
- Knape, B.K., 1984, Underground Injection Operations in Texas: a Classification and Assessment of Underground Injection Activities. Texas Department of Water Resources, Austin, Texas.
- Lawrence, A.R., Morris, B.L., Foster, S.S.D., 1998, Hazards induced by groundwater under rapid urbanization. Geohazards in Engineering Geology, *Geological Society of London, Engineering Geology Special Publication*, **15**, 319-328.
- Lee, J.Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea. *Renewable & Sustainable Energy Review* (in press).
- Lee, J.Y., Hahn, J.S., 2006, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: implications for heat pumps. *J. Hydrol.*, **329**, 514-526.
- Lee, J.Y., Won, J.H., Hahn, J.S., 2006, Evaluation of hydrogeologic conditions for groundwater heat pumps: analysis with data from national groundwater monitoring stations. *Geosciences J.*, **10**(1), 91-99.
- MDNR (Missouri Department of Natural Resources), 2004, Rules of Department of Natural Resources Division 23-Division of Geology and Land Survey, Chapter 5-Heat Pump Construction Code. MNDR, Missouri, p. 6.
- McCray, K.B., 1998, Guidelines for the construction of vertical boreholes for closed loop heat pump systems. *Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference*, Stockton College of New Jersey, p. 1-9.
- Mehnert, E., 2004, The Environmental Effects of Ground-Source Heat Pumps-A Preliminary Overview. Illinois State Geological Survey, ISGS Open-File Series Report 2004-2, p. 9.
- NRCAN (Natural Resources Canada), 2002b, Commercial Earth Energy Systems: A Buyer's Guide. NRCAN, Her Majesty the Queen in Right of Canada, p. 89.
- PADEP (Pennsylvania Department of Environmental Resources), 1996, Ground Source Heat Pump Manual. Bureau of Water Quality Management, Department of Environmental Protection, DEP #1562.
- Rafferty, K.D., 2001, Design aspects of commercial open-loop heat pump systems. *GHC Bulletin*, **22**, 16-24.
- Rutherford, S., 2004, Groundwater use in Canada: heat pump. *West Coast Environmental Law*, p. 1.
- Rybach, L., 2003, Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, **32**, 463-470.
- Snyder, M., Lee, C.H., 1980, Survey of Rejection Experience from Ground Water Cooling Applications. Midwest Research Institute for Pacific Northwest Laboratory, U.S. DOE, DE-AC06-76RLO 1830.
- Sowers, L.S., Epstein, C., York, K.P., van Guilder, B., Jahangir, S., Steinberg, A., Stafford, L., Pierce, J., Brownhill, J., Solomon, T., 1997, Impact of a large scale geothermal project on its surface and subterranean environment. *Proceedings of the 7th International Conference on Thermal Energy Storage MEGAS-TOCK*, **1**, 85-90.
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers), 2008, Water-Loop and Ground-Loop Heat Pump Systems. UFGS-23 81 47 (April 2008), p. 67.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1993, Space Conditioning: The Next Frontier-The Potential of Advanced Residential Space Heating Technologies for Reduction Pollution and Saving Customers Money. USEPA, Washington, p. 103.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1997, Manual on Environmental Issues Related to Geothermal Heat Pump Systems. USEPA Atmospheric Pollution Prevention Division, Washington, D.C.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1999, The Class V Underground Injection Control Study. Volume 19, Heat Pump and Air Conditioning Return Flow Wells. USEPA, EPA/816-R-99-014s, p. 60.
- Williams, A.L., Sveter, 1987, Air conditioning earth coupled water source heat pumps-closed and open-loop systems. *Proceedings of International Symposium on Class V Well Technology*, Underground Injection Practices Council, Oklahoma City, OK, p. 455-458.
- Yasukawa, K., Takasugi, S., 2003, Present status of promotion of underground thermal utilization in Japan. *Proceedings of European Geothermal Conference (EGC2003)*, Szeged, Hungary, p. 1-8.
- York, K.P., Jahangir, Z.M.G.S., Solomon, T., Stafford, L., 1998, Effects of a large scale geothermal heat pump installation on aquifer microbiology. *Proceedings of the 2nd Stockton Geothermal Conference*, p. 1-8.